

2026

Consórcio de cana-de-açúcar com Crotalaria spectabilis, em ciclo de cana planta após soja

Silva, Luís Guilherme Pereira da

Universidade Estadual do Norte do Paraná

SILVA, Luís Guilherme Pereira da. Consórcio de cana-de-açúcar com Crotalaria spectabilis, em ciclo de cana planta após soja. Orientadora: Erika Cosendey Toledo de Mello Peixoto. 2026. 38 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Centro de Ciências Agrárias, Campus Luiz Meneghel, Universidade Estadual do Norte do Paraná, Bandeirantes, 2026.

<https://repositorio.uenp.edu.br/handle/123456789/945>

Baixado de Repositório Institucional UENP



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE DO PARANÁ
CAMPUS LUIZ MENEGHEL
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
AGRONOMIA (PPAGRO)

LUÍS GUILHERME PEREIRA DA SILVA

CONSÓRCIO DE CANA-DE-AÇÚCAR COM *Crotalaria spectabilis*, EM CICLO DE
CANA PLANTA APÓS SOJA

BANDEIRANTES, PR, BRASIL
2026

LUÍS GUILHERME PEREIRA DA SILVA

**CONSÓRCIO DE CANA-DE-AÇÚCAR COM *Crotalaria spectabilis*, EM CICLO DE
CANA PLANTA APÓS SOJA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (PPAGRO), da Universidade Estadual do Norte do Paraná, *Campus* Luiz Meneghel.

Orientadora: Prof^ª Dr^ª Erika Cosendey Toledo de Mello Peixoto

Coorientador: Prof. Dr. Oriel Tiago Kölln

BANDEIRANTES, PR, BRASIL
2026

Ficha de identificação do material elaborada com base nos dados informados, por meio do sistema de geração automática customizado pelo Núcleo de Tecnologia da Informação da Universidade Estadual do Norte do Paraná (NTI-UENP)

Silva, Luís Guilherme Pereira da
CONSÓRCIO DE CANA-DE-AÇÚCAR COM *Crotalaria*
spectabilis, EM CICLO DE CANA PLANTA APÓS SOJA / Luís
Guilherme Pereira da Silva; orientadora: Erika Peixoto;
coorientador: Oriel Kölln. – Bandeirantes, 2026.
38 p.

Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Campus Luiz
Meneghel / Universidade Estadual do Norte do Paraná.
Bibliografia
Versão corrigida

1. consórcio de plantas. 2. *crotalaria spectabilis*. 3.
cana-de-açúcar. 4. seletividade de herbicidas. 5.
produtividade. I. Peixoto, Erika. II. Título.

LUÍS GUILHERME PEREIRA DA SILVA

**CONSÓRCIO DE CANA-DE-AÇÚCAR COM *Crotalaria spectabilis*, EM CICLO DE
CANA PLANTA APÓS SOJA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (PPAGRO), da Universidade Estadual do Norte do Paraná, *Campus* Luiz Meneghel.

Aprovada em: __/__/2026

COMISSÃO EXAMINADORA

Oriel Tiago Kölln

Universidade Estadual do Norte do Paraná

Claudinei Paulo de Lima

UNIFIO – Centro Universitário Ourinhos

Gustavo Dário

Universidade Estadual do Norte do Paraná

Prof.^a Dr. Oriel Tiago Kölln
CoOrientador
Universidade Estadual do Norte do Paraná,
Campus Luiz Mengehel

DEDICATÓRIA

À minha família, à minha futura esposa, aos meus orientadores e à Fazenda Santa Rosa.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, tenho que agradecer a Doutora Erika Cosendey Toledo de Mello Peixoto que me abriu as portas e esteve ao meu lado desde o início, acreditando no trabalho e na construção de uma verdadeira parceria entre mentor e mentorado. Proporcionando uma verdadeira relação de aluno e professor, onde sempre tive todas as minhas dúvidas sanadas, apoio constante e total dedicação ao trabalho. O meu muito obrigado por ter tido uma experiência completa no ensino acadêmico.

Ao professor Doutor Oriel Tiago Kölln, em que me forneceu todo o aparato de seu laboratório para que a pesquisa pudesse ser realizada, além de muitas reuniões técnicas para a construção e execução da metodologia de forma correta e alinhada as melhores técnicas agronômicas. Obrigado pelos materiais de leitura que me auxiliaram no aperfeiçoamento profissional e no meu desenvolvimento como pesquisador e cientista.

Ao professor Diego Resende Rodrigues por ter me orientado, auxiliado e ensinado a trabalhar com estatística, desde o software R até mesmo a teoria e aplicação das análises, sempre solicito nas mais diversas datas e horários.

A Esmeralda Aparecida Soares e pelo Marcos Yassuhiro Inoue pelo auxílio no laboratório para a execução das análises pertinentes ao trabalho.

A Cosme Freire da Silva, Claudiney Pereira e José Eduardo Pereira da Silva Filho, por me ajudarem integralmente na coleta da cana-de-açúcar, das plantas daninhas e da *Crotalaria spectabilis*. Sempre estiveram ao meu lado, muito atenciosos e sempre dispostos a entregar o melhor para a realização do trabalho. Mesmo enfrentando desafios e muito trabalho árduo, estavam sempre acreditando no projeto do começo ao fim.

À família Pereira da Silva e da Fazenda Santa Rosa de Lima, representados por Ana Lúcia Pereira da Silva Mariotto, José Eduardo Pereira da Silva Filho e a Renato Pereira da Silva, pela confiança que sempre me dispuseram para a realização de inovações.

A Miriam Cristina Martins Pereira da Silva, por sempre me apoiar e incentivar nas decisões que tomei ao longo da vida.

A minha noiva e futura esposa, Mariana Rocha Vidal, por sempre estar ao meu lado acreditando em mim e me incentivando. Obrigado por todas as horas que você me ajudou e me acompanhou nessa trajetória. Estarei sempre ao seu lado. Te Amo.

A Coordenação de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – código de Financiamento 001.

“Se você quer fazer pequenas mudanças, mude o modo como você faz as coisas; se você quer fazer grandes mudanças, mude o modo como você vê as coisas.”

— (Don Campbell)

SILVA, Luís Guilherme Pereira da. **Consórcio de cana-de-açúcar com *Crotalaria spectabilis*, em ciclo de cana planta após soja.** 2026. *Dissertação de Mestrado em Agronomia (PPAGRO)*- Universidade Estadual do Norte do Paraná, Campus Luiz Meneghel, Bandeirantes, 2026.

RESUMO - O manejo de plantas daninhas na cana-de-açúcar se baseia no uso de herbicidas pré-emergentes, mas sua eficácia é limitada por múltiplos fatores, como clima e solo, exigindo estratégias integradas de manejo. O uso da *Crotalaria spectabilis* como planta de cobertura é promissor, porém sua associação com doses reduzidas de herbicidas carece de validação quanto à seletividade e eficácia. Este trabalho consistiu em avaliar o manejo associativo de *Crotalaria spectabilis* e herbicidas em doses reduzida no ciclo cana-planta, testando a supressão de plantas daninhas, seletividade da leguminosa aos herbicidas e o impacto na produtividade da cana. Utilizando delineamento em blocos casualizados, os seguintes tratamentos foram avaliados com 5 repetições: T1) crotalária (Crot); T2) herbicida em dose reduzida (HPEm: 752 g i.a. ha⁻¹ clomazone + 175 g i.a. ha⁻¹ sulfentrazone); T3) herbicida em dose máxima de bula (HPEm); T4) crotalária associada ao herbicida em dose reduzida (Crot+HPEm) e T5) controle. Foram avaliadas a biomassa e nutrientes da crotalária, fitossociologia das plantas daninhas e produtividade da cana. O tratamento Crot+HPEm aumentou a biomassa da crotalária em 57%, e ampliou a ciclagem de nutrientes, sugerindo efeito de bioestimulação. Todos os tratamentos mantiveram níveis gerais de infestação muito baixos, contudo os tratamentos com herbicidas isolados proporcionaram controle total. O consórcio Crot+HPEm em relação à crotalária solteira, teve menor supressão de plantas daninhas permitindo a emergência seletiva de *Senna obtusifolia*. A produtividade da cana variou entre 101,8 e 114,2 t ha⁻¹, e a qualidade industrial não diferiu entre os tratamentos. Os resultados confirmam que o consórcio suprime eficazmente as plantas daninhas, a dose reduzida de herbicida é seletiva e estimula a crotalária, e a produtividade da cana não é afetada pelo consórcio. Conclui-se que a *Crotalaria spectabilis* associada a herbicida em dose reduzida contribui para o controle integrado sustentável de plantas daninhas na cana-de-açúcar, demonstrando viabilidade agrônômica.

Palavras-chave: Leguminosa de cobertura. Seletividade de herbicidas. Manejo integrado. Bioestimulação microbiana. Supressão seletiva.

SILVA, Luís Guilherme Pereira da. **Sugarcane-*Crotalaria spectabilis* intercropping in plant cane cycle after soybean**. 2026. Master's Dissertation in the Graduate Program in Agronomy (PPAGRO) – State University of Northern Paraná, Bandeirantes, 2026.

ABSTRACT - Weed management in sugarcane is primarily based on pre-emergence herbicides; however, its effectiveness is constrained by multiple factors, such as climate and soil conditions, thereby requiring integrated management strategies. The use of *Crotalaria spectabilis* as a cover crop is promising; yet, its association with reduced herbicide doses lacks validation regarding selectivity and efficacy. This study aimed to evaluate the integrated management of *Crotalaria spectabilis* and reduced herbicide doses during the plant cane cycle, testing weed suppression, legume selectivity to herbicides, and the impact on sugarcane yield. Using a randomized complete block design, the following treatments were evaluated in five replications: T1) *C. spectabilis* (Crot); T2) reduced herbicide dose (HPEm: 752 g a.i. ha⁻¹ clomazone + 175 g a.i. ha⁻¹ sulfentrazone); T3) full label herbicide dose (HPEM); T4) *C. spectabilis* associated with the reduced herbicide dose (Crot+HPEm); and T5) control. We assessed cover crop biomass and nutrient accumulation, weed phytosociology, and sugarcane yield. The Crot+HPEm treatment increased *C. spectabilis* biomass by 57% and enhanced nutrient cycling, suggesting a biostimulation effect. All treatments maintained very low overall weed infestation levels, but the herbicide-only treatments provided complete weed control. The Crot+HPEm intercrop showed lower weed suppression compared to *C. spectabilis* alone, allowing the selective emergence of *Senna obtusifolia*. Sugarcane yield ranged from 101.8 to 114.2 t ha⁻¹, and industrial quality parameters did not differ among treatments. Our results confirm that the intercrop effectively suppresses weeds, the reduced herbicide dose is selective and stimulates cover crop growth, and sugarcane yield is not affected by the intercrop. We conclude that *Crotalaria spectabilis* associated with a reduced herbicide dose contributes to sustainable integrated weed management in sugarcane, demonstrating agronomic viability.

Keywords: Legume cover crop. Herbicide selectivity. Integrated management. Microbial biostimulation. Selective suppression.

Sumário

1. REVISÃO DE LITERATURA	1
1.1. INTRODUÇÃO E CONTEXTO AGRONÔMICO	1
1.2. DINÂMICA E COMPORTAMENTOS DO CLOMAZONE E SULFENTRAZONE NO SOLO	2
1.3. PLANTAS DE COBERTURA E CONTROLE CULTURAL DE PLANTAS DANINHAS.....	4
1.4. SELETIVIDADE DE HERBICIDAS PARA PLANTAS DE COBERTURA EM CONSÓRCIO	6
1.5. RESPOSTA DA CANA-DE-AÇÚCAR A SISTEMAS CONSORCIADOS	6
1.6. LACUNA DO CONHECIMENTO E JUSTIFICATIVA PARA O ESTUDO	7
2. REFERÊNCIAS	8
3. CONSÓRCIO DE CANA-DE-AÇÚCAR COM <i>CROTALARIA SPECTABILIS</i>, EM CICLO DE CANA PLANTA APÓS SOJA	12
4. INTRODUÇÃO	13
5. MATERIAL E MÉTODOS.....	16
5.1. ÁREA EXPERIMENTAL.....	16
5.2. IMPLANTAÇÃO DOS TRATAMENTOS.....	17
5.2.1. Histórico da área experimental	17
5.2.2. Delineamento experimental	18
5.2.3. Tratamentos e doses aplicadas	18
5.2.4. Implantação da cultura e condução do experimento.....	19
5.3. AVALIAÇÃO DA BIOMASSA E NUTRIENTES DA <i>CROTALARIA SPECTABILIS</i>.....	20
5.4. LEVANTAMENTO FITOSSOCIOLÓGICO E ANÁLISE DA BIOMASSA DAS PLANTAS DANINHAS	20
5.5. AVALIAÇÃO DA PRODUTIVIDADE, CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS E QUALIDADE INDUSTRIAL DA CANA-DE-AÇÚCAR	21
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	23

6.1. RESPOSTA DA <i>CROTALARIA SPECTABILIS</i> NOS TRATAMENTOS T1 E T4: BIOMASSA E NUTRIENTES	23
6.2. DINÂMICA E SUPRESSÃO DA COMUNIDADE INFESTANTE	26
6.3. PRODUTIVIDADE, CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS E QUALIDADE INDUSTRIAL DA CANA-DE-AÇÚCAR	29
7. CONCLUSÕES	33
8. AGRADECIMENTOS.....	34
9. REFERÊNCIAS	35

1. REVISÃO DE LITERATURA

1.1. INTRODUÇÃO E CONTEXTO AGRONÔMICO

A transição para modelos agrícolas de baixo impacto é um movimento global, refletido em conceitos como o "crescimento verde" (*green growth*), que visa aliar desenvolvimento econômico à preservação ambiental (Habib *et al.*, 2023). Na canavieicultura brasileira, este desafio se evidencia pela necessidade de superar a dependência do modelo convencional, historicamente pautado na monocultura e no uso intensivo de insumos químicos, um legado da “Revolução Verde” associado à degradação do solo e à contaminação ambiental (Primavesi, 2016).

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) constitui uma das culturas de maior relevância socioeconômica no Brasil. A produtividade da cana-de-açúcar é influenciada por um conjunto de fatores, entre os quais se destacam condições climáticas, os atributos químicos e físicos do solo, o manejo nutricional, a incidência de pragas e doenças, além da interferência das plantas daninhas (Almeida; Ferrão, 2022). Estas competem por recursos essenciais (luz, água e nutrientes), hospedam pragas e doenças, além de dificultarem as operações de colheita, reduzindo a produtividade e aumentando os custos operacionais. Diante deste quadro, o manejo de plantas daninhas representa um dos custos operacionais e ambientais mais significativos. A interferência de infestantes pode causar perdas de produtividade que variam de 40% a 90% nos canaviais (Favoreto *et al.*, 2023).

Embora o controle químico com herbicidas residuais em pré-emergência seja a estratégia predominante, o controle das plantas daninhas requer longos períodos na canavieicultura, sendo necessários o uso de herbicidas com ação residual prolongada (Nicolai *et al.*, 2010), essa exigência aumenta o risco de falha exigindo mais de uma aplicação ou intervenções complementares onerosas em pós-emergência, como a operação de "catação química dirigida", que elevam os custos com mão de obra e a exposição dos operadores (Christoffoleti *et al.*, 2004). Esta realidade demanda estratégias inovadoras de Manejo Integrado de Plantas Daninhas (MIPD) que reduzam a dependência de herbicidas sem comprometer a eficácia do controle.

Nesse cenário, o cultivo consorciado com leguminosas de cobertura, como espécies do gênero *Crotalaria*, representa estratégia promissora favorável à agricultura sustentável.

Leguminosas contribuem para ciclagem de nutrientes, fixação biológica de nitrogênio (FBN), proteção do solo contra erosão e a supressão de plantas daninhas por meio da competição e de possíveis efeitos alelopáticos (Lima Filho *et al.*, 2023a; Vanolli *et al.*, 2024). A integração destas práticas culturais com o controle químico racional, utilizando doses recomendadas ou aplicações localizadas, representa importante modelo de Manejo Integrado de Plantas Daninhas (MIPD).

1.2. DINÂMICA E COMPORTAMENTOS DO CLOMAZONE E SULFENTRAZONE NO SOLO

A eficiência de um herbicida aplicado em pré-emergência é diretamente determinada pela sua disponibilidade na solução do solo, a qual é influenciada por processos de sorção, lixiviação e degradação. O sulfentrazone, um herbicida do grupo das triazolinonas, é quimicamente classificado como um ácido fraco, com ponto de dissociação constante (pKa) de 6.5 (Gehrke; Camargo; Avila, 2020).

Esta propriedade define o estado de ionização da molécula em função do pH do solo, se o pH foi maior do que 6.5, a molécula predomina na forma aniônica, mais solúvel em água e com maior mobilidade no perfil do solo, em solos com pH menor que 6.5, a molécula predomina na forma protonada (neutra). Embora esta forma apresente maior lipofilicidade e portanto, maior potencial de absorção pelas raízes, ela também exibe menor solubilidade em água e maior afinidade por sorver aos coloides do solo, especialmente à matéria orgânica (Gehrke; Camargo; Avila, 2020).

Portanto, em solos ácidos, uma fração significativa do sulfentrazone aplicado pode ficar retida na matriz sólida do solo, atuando como reservatório de liberação lenta. Este fenômeno de sorção induzida pela acidez reduz a concentração imediata do ingrediente ativo na solução do solo, atenuando seu efeito herbicida (Gehrke; Camargo; Avila, 2020), e permitindo o escape de espécies naturalmente tolerantes, como *S. obtusifolia*.

O clomazone pertence ao grupo químico das isoxazolidinonas e atua como inibidor da síntese de carotenoides, causando o branqueamento das folhas das plantas suscetíveis. Apresenta alta solubilidade em água (1100 mg L⁻¹ a 25°C) e pressão de vapor de 18,9 mPa a 25°C, conferindo alto potencial de volatilização e lixiviação (Locke *et al.*, 1996). Sua sorção ao solo é influenciada principalmente pelo teor de matéria orgânica, com coeficiente

de adsorção (Koc) de aproximadamente 150 mL g⁻¹, indicando moderada afinidade pelos colóides do solo (Loux; Liebl; Slife, 1989).

A sorção do clomazone é um processo dependente do tempo (Mervosh *et al.*, 1995) observaram que o coeficiente de sorção aparente (Kd) do clomazone aumentou continuamente ao longo de 84 dias de incubação, com aumentos de 2,4 a 4,1 vezes dependendo da temperatura. Esse fenômeno implica que, com o passar do tempo, a fração do herbicida disponível na solução do solo diminui, enquanto a fração retida aumenta. A degradação do clomazone no solo é essencialmente microbiana e ocorre mais rapidamente sob condições de maior temperatura e umidade. (Mervosh *et al.*, 1995) verificaram que a meia-vida do clomazone variou de 11 a 50 dias em solo franco-siltoso e de 18 a 126 dias em solo franco-argilo-siltoso, dependendo da dose aplicada. (Locke *et al.*, 1996) demonstraram que temperaturas elevadas (35°C) aumentam a volatilização do clomazone, enquanto menores umidades do solo tendem a reduzir esse processo.

Além dos efeitos diretos de fitotoxicidade ou seletividade, os herbicidas aplicados ao solo podem desencadear respostas indiretas nas culturas por meio de sua interação com a comunidade microbiana edáfica. Os efeitos dos pesticidas na microbiota são complexos e específicos, podendo ser inibitórios para grupos sensíveis ou estimulatórios para populações adaptadas (Hussain *et al.*, 2009; Jeyaseelan *et al.*, 2024). Espécies bacterianas ou fúngicas resistentes são capazes de utilizar as moléculas do herbicida, ou seus produtos de degradação, como fonte de carbono, nitrogênio ou energia, resultando na estimulação seletiva de suas populações (Jeyaseelan *et al.*, 2024).

Este processo de degradação microbiana pode aumentar a atividade biológica do solo, medida por indicadores como a respiração edáfica, à medida que a comunidade microbiana consome a nova fonte de carbono (Hussain *et al.*, 2009). Por exemplo, há evidências de que o sulfentrazone pode elevar as populações totais de bactérias e fungos. (Martinez *et al.*, 2008) isolaram espécies microbianas com alto potencial de degradação, capazes de utilizar altas concentrações de sulfentrazone (7.0 µg mL⁻¹) como única fonte de carbono. Adicionalmente, a aplicação de alguns herbicidas pode aumentar a diversidade funcional e a cooperação entre microrganismos na rizosfera (Jeyaseelan *et al.*, 2024).

Para o clomazone a sua persistência no solo é inversamente correlacionada com a atividade microbiana, sendo sua meia-vida significativamente menor em solos com maior

atividade biológica (Mervosh *et al.*, 1995). A degradação microbiana do clomazone libera metabólitos que podem servir como fonte de carbono para populações microbianas adaptadas, estimulando seletivamente certos grupos funcionais. (Du *et al.*, 2018) observaram que a aplicação do clomazone na dose recomendada não afetou negativamente a abundância bacteriana, a diversidade microbiana ou os genes envolvidos no ciclo do nitrogênio.

Dessa forma, um herbicida aplicado em subdose pode atuar como agente modulador da comunidade microbiana, acelerando processos de mineralização da matéria orgânica do solo e ciclagem de nutrientes. Essa microbiota estimulada e em maior atividade pode, consequentemente, criar um ambiente rizosférico mais favorável ao crescimento das plantas, liberando nutrientes de forma mais sincronizada. Este mecanismo representa importante potencial para promoção do efeito indireto de bioestimulação que pode superar eventuais efeitos fitotóxicos menores, resultando em incrementos de biomassa não atribuíveis ao controle de plantas daninhas.

1.3. PLANTAS DE COBERTURA E CONTROLE CULTURAL DE PLANTAS DANINHAS

A supressão de plantas daninhas por plantas de cobertura resulta de mecanismos físicos e alelopáticos, que atuam de forma complementar. Do ponto de vista físico, as plantas de cobertura exercem competição por espaço, luz, água e nutrientes, sendo a produção de biomassa aérea um fator determinante para o sombreamento e a redução da emergência e do desenvolvimento das plantas daninhas (Mennan *et al.*, 2020). Espécies como centeio (*Secale cereale*) e aveia (*Avena sativa*), são capazes de acumular biomassa rapidamente, são particularmente eficazes na supressão de plantas daninhas, reduzindo tanto a densidade quanto a biomassa das invasoras (Mennan *et al.*, 2020).

Adicionalmente, muitas plantas de cobertura, especialmente as pertencentes às famílias *Poaceae* e *Brassicaceae*, produzem compostos alelopáticos que inibem a germinação e o crescimento de plantas daninhas. O centeio, por exemplo, libera benzoxazinoides como DIBOA (2,4-dihidroxi-1,4-benzoxazin-3-ona) e BOA (2-benzoxazolinona), enquanto espécies de *Brassica* produzem glucosinolatos que, no solo, se transformam em isotiocianatos com efeito herbicida (Mennan *et al.*, 2020). A cobertura do solo rápida e densa, combinada à ação de aleloquímicos, favorece o controle natural e

sustentável de plantas daninhas, sendo essencial para sistemas de produção orgânica e de plantio direto de hortaliças.

A *Crotalaria spectabilis* é uma leguminosa reconhecida por seu rápido crescimento e alta produção de biomassa (4-6 t ha⁻¹ de matéria seca), capaz de estabelecer cobertura do solo competitiva em 80 a 100 dias (Lima Filho *et al.*, 2023b). Seus benefícios transcendem a supressão física de plantas daninhas por competição, incluindo a fixação biológica de nitrogênio e a melhoria das propriedades do solo (Vanolli *et al.*, 2024). Em sistemas consorciados estas leguminosas podem reduzir a cobertura de plantas daninhas em níveis comparáveis aos tratamentos com herbicidas.

Além de suprimir plantas daninhas por competição e alelopatia, o cultivo de leguminosas de cobertura favorece o ambiente do solo. Ao fixar nitrogênio atmosférico e promover a atividade microbiana, essas plantas melhoram a fertilidade e a estrutura da rizosfera, criando um microambiente ou ecótipo enriquecido. Este novo ambiente, no entanto, não é seletivo; ao favorecer o ciclo de nutrientes, pode também beneficiar o estabelecimento de espécies oportunistas. Dessa forma, a própria sucessão vegetal induzida pelo manejo pode ser monitorada por plantas indicadoras, que sinalizam as transformações ocorridas no ecossistema edáfico (Primavesi, 2016). Portanto, o manejo de coberturas deve considerar não apenas a supressão inicial, mas também as mudanças ecológicas de longo prazo que ele provoca.

Entre as espécies que podem se beneficiar deste ambiente, destaca-se *Senna obtusifolia*, popularmente conhecida como fedegoso, uma leguminosa anual, de ciclo relativamente curto e elevada produção de sementes, as quais apresentam dormência física e formam um banco de sementes de longa duração no solo (Marques *et al.*, 2023). Sua tolerância a herbicidas, especialmente ao sulfentrazone, está associada à alta taxa metabólica de detoxificação na folhagem, que converte rapidamente o herbicida em derivados menos fitotóxicos (Dayan; Weete; Hancock, 1996). Como resultado, doses que controlam eficazmente outras espécies mostram-se insuficientes para *S. obtusifolia*, que exige doses superiores a 300 g ha⁻¹ de sulfentrazone para controle satisfatório em campo (Takano *et al.*, 2015; Araújo *et al.*, 2018).

No entanto, como destacado por (Soulé *et al.*, 2024), este resultado frequentemente depende de um manejo integrado, onde o efeito supressor da planta de cobertura é

complementado por capinas manuais a fim de eliminar escapes, especialmente de espécies tolerantes ou de folhas largas de grande porte. Em seu estudo, o tratamento com plantas de cobertura atingiu o mesmo nível de controle do tratamento químico sintético, mas com aumento de 86% na necessidade de capinas manuais nas entrelinhas. Isso revela que o uso de plantas de cobertura isoladamente, não substitui em todos os casos o controle químico sintético, portanto deve ser utilizada como componente em um sistema de manejo integrado de plantas daninhas (MIPD).

1.4. SELETIVIDADE DE HERBICIDAS PARA PLANTAS DE COBERTURA EM CONSÓRCIO

A viabilidade do MIPD que integra controle químico sintético e cultural depende da seletividade dos herbicidas para a espécie de cobertura. No contexto do consórcio cana-crotalária, é essencial que os herbicidas aplicados em pré-emergência não comprometam o estabelecimento e a produção de biomassa da leguminosa, porém a resposta é específica para cada molécula.

Para o clomazone, a seletividade para *Crotalaria spectabilis*, ocorre mesmo em doses elevadas, sem causar fitotoxicidade significativa ou redução na produção de massa seca (Dias *et al.*, 2017; Souza *et al.*, 2023). Em contraste, a resposta ao sulfentrazone é menos consensual e mais sensível à dose. Embora seja seletivo em baixas concentrações, relatos indicam que doses superiores a 150 g ha⁻¹ de ingrediente ativo podem causar fitotoxicidade e reduzir a biomassa de *C. spectabilis* (Braz *et al.*, 2015).

Portanto, a aplicação de uma mistura contendo ambas as moléculas em doses reduzidas constituem uma prática que carece de validação experimental em condições de consórcio, onde a leguminosa já está submetida ao estresse do sombreamento pelo dossel da cana, fator que por si só limita seu potencial produtivo (Dantas *et al.*, 2015; Lima Filho *et al.*, 2023a).

1.5. RESPOSTA DA CANA-DE-AÇÚCAR A SISTEMAS CONSORCIADOS

A produtividade de culturas comerciais em sistemas consorciados com plantas de cobertura é variável. Metanálises e revisões sobre o tema em diversas culturas, incluindo a cana-de-açúcar, indicam que o efeito médio sobre a produtividade da cultura principal tende a ser neutro (Verret *et al.*, 2017; Viaud *et al.*, 2023). Casos de aumento ou redução

significativa são geralmente atribuídos as interações específicas entre as espécies consorciadas, práticas de manejo e condições ambientais.

Em conformidade com essa tendência, estudos de campo específicos com cana-de-açúcar e plantas companheiras frequentemente registram produtividades equivalentes às do cultivo solteiro (Kaur; Bhullar; Gill, 2016; Raza *et al.*, 2024), atestando a viabilidade agrônômica do sistema. Desse modo, o consórcio configura uma estratégia de cultivo que pode manter a produtividade da cana-de-açúcar enquanto proporciona outros benefícios ao agroecossistema.

1.6. LACUNA DO CONHECIMENTO E JUSTIFICATIVA PARA O ESTUDO

A literatura fornece fundamentos sólidos para os componentes individuais do sistema como a resposta de plantas daninhas a herbicidas, a seletividade de leguminosas e a produtividade da cana em consórcios. No entanto, as interações dinâmicas entre o controle químico sintético (herbicidas pré-emergentes) e o controle cultural (plantas de cobertura) permanecem pouco exploradas. Especificamente, persistem lacunas de evidências quanto à forma pela qual essa interação modula a comunidade de plantas daninhas, a performance da leguminosa e o resultado agrônômico final.

Dessa forma, a fim de favorecer a resolução deste problema de forma integrada, o presente estudo foi concebido a fim de avaliar as seguintes hipóteses inter-relacionadas: i) o sistema consorciado de cana-de-açúcar com *Crotalaria spectabilis*, sob aplicação de herbicidas pré-emergentes em dose reduzida, suprimirá a comunidade geral de plantas daninhas. ii) A aplicação da mistura de herbicidas em dose reduzida (752 g i.a. ha⁻¹ de clomazone + 175 g i.a. ha⁻¹ de sulfentrazone) será seletiva para *C. spectabilis*, não afetando significativamente seu estabelecimento e acúmulo de biomassa. iii) A produtividade e a qualidade industrial da cana-de-açúcar em consórcio não diferirão daquelas obtidas no sistema convencional sem consórcio.

2. REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, E. I. B.; FERRÃO, G. E (org.). Fundamentos em biologia e manejo de plantas daninhas. São Luís, EDUFMA, 2022, 215 p.
- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift, Berlin, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ARAÚJO, L. S. *et al.* Tolerância do fedegoso ao glyphosate e alternativas de controle. 2018, Anais.. Brasília, DF: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 2018. p. 1079: il. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br>. Acesso em: 24 maio 2016.
- BRAZ, G. B. P. *et al.* Selection of herbicides targeting the use in crop systems cultivated with showy crotalaria. Planta Daninha, Viçosa, v. 33, n. 3, p. 521–534, 2015.
- BRAZ, G. B. P. *et al.* Alternativas para o controle químico de plantas voluntárias de crotalária em diferentes modalidades de aplicação. Revista Brasileira de Herbicidas, Londrina, v. 16, n. 2, p. 91, 2017.
- SOUZA, R. C. de *et al.* Selectivity of residual herbicides used in sugarcane crops for crotalaria species. Revista Científica da Faculdade de Educação e Meio Ambiente, [S. l], v. 14, n.2, p. 435-446, 2023. DOI: 10.31072/rcf.v14i2.1362. Disponível em: <https://revista.uni-faema.edu.br/index.php/Revista-FAEMA/article/view/1362>. Acesso em: 24 maio 2026.
- CHRISTOFFOLETI, P. J. *et al.* Manejo de Plantas Daninhas na Cultura da Cana-de-açúcar: Novas Moléculas Herbicidas. Sinal Verde, São Paulo, v. 10, n. 19, p. 8-9, set. 2004.
- DANTAS, R. A. *et al.* Produção de matéria seca e controle de plantas daninhas por leguminosas consorciadas com cana-de-açúcar em cultivo orgânico. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 50, n. 8, p. 681–689, 2015.
- DAYAN, F. E.; WEETE, J. D.; HANCOCK, H. G. Physiological basis for differential sensitivity to sulfentrazone by sicklepod (*Senna obtusifolia*) and coffee senna (*Cassia occidentalis*). Weed Science, v. 44, n. 1, p. 12-17, 1996.
- DIAS, R. C. *et al.* Seletividade inicial de herbicidas aplicados em pós-emergência da crotalária. Revista Brasileira de Herbicidas, v. 16, n. 1, p. 76, 2017.
- DU, P. *et al.* Clomazone influence soil microbial community and soil nitrogen cycling. Science of the Total Environment, v. 644, p. 475–485, 2018.
- FAVORETO, L.; CHRISTOFFOLETI, P. J.; BORGES, Á. V. Desafios no manejo de plantas daninhas em cana-de-açúcar. Informações Agronômicas: Proteção de Plantas, n. 1, abr. 2023. Disponível em: <www.npct.com.br/IAProtecao>. Acesso em: 24 maio 2026.

GEHRKE, V. R.; CAMARGO, E. R.; AVILA, L. A. Sulfentrazone: environmental dynamics and selectivity. *Sociedade Brasileira da Ciência das Plantas Daninhas*, v. 38, 2020. DOI: 10.1590/S0100-83582020380100032.

HABIB, A. *et al.* Measuring green growth in agriculture: a comparative analysis of world economies. *Quality and Quantity*, v. 57, n. 6, p. 5491–5511, 2023.

HUSSAIN, S. *et al.* Impact of pesticides on soil microbial diversity, enzymes, and biochemical reactions. In: *Advances in Agronomy*. Academic Press, 2009. v. 102, p. 159-200

JEYASEELAN, A. *et al.* A review of the impact of herbicides and insecticides on the microbial communities. *Environmental Research*, v. 245, 2024. DOI: 10.1016/j.envres.2023.118020.

KAUR, N.; BHULLAR, M. S.; GILL, G. Weed management in sugarcane-canola intercropping systems in northern India. *Field Crops Research*, v. 188, p. 1–9, 2016. DOI: 10.1016/j.fcr.2016.01.009.

LIMA FILHO, O. F. *et al.*(org.). *Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil*. 2. ed., 2023. v.1.

LIMA FILHO, O. F. *et al.* (org.). *Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil*. 2. ed., 2023. v.2.

LOCKE, M. A. *et al.* Clomazone volatilization under varying environmental conditions. *Chemosphere*, v. 35, n. 10, p. 1213-1225, 1996.

LOUX, M. M.; LIEBL, R. A.; SLIFE, F. W. Adsorption of clomazone on soils, sediments, and clays. *Weed Science*, v. 37, n. 3, p. 440-444, 1989.

MARQUES, R. F. *et al.* Emergence and development of weeds according to the sowing depth and light intensity. *Revista Caatinga*, v. 36, n. 3, p. 502–512, 2023.

MARTINEZ, C. O. *et al.* The effects of moisture and temperature on the degradation of sulfentrazone. *Geoderma*, v. 147, n. 1–2, p. 56–62, 2008. DOI: 10.1016/j.geoderma.2008.07.005.

MENNAN, H. *et al.* Non-chemical weed management in vegetables by using cover crops: a review. *Agronomy*, v. 10, n. 2, 257, 2020. DOI: 10.3390/agronomy10020257.

MERVOSH, T. L. *et al.* Clomazone sorption in soil: Incubation time, temperature, and soil moisture effects. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 43, n. 8, p. 2295–2300, 1995. DOI: 10.1021/jf00056a017.

NICOLAI, M. *et al.* Programas de manejo químico de plantas daninhas em plantio de cana-de-açúcar fundamentados em duas aplicações de herbicidas. *Revista Agrogeoambiental*, v. 2, n. 3, 2010.

PRIMAVESI, Ana. Manejo ecológico de “pragas” e doenças : técnicas alternativas para a produção agropecuária e defesa de meio ambiente. 2. ed. São Paulo: Expressão Popular, 2016.

RAZA, M. A. *et al.* Sugarcane/soybean intercropping enhances crop productivity, nutrient uptake, and net economic return with reduced inputs. *Field Crops Research*, v. 314, 2024. DOI: 10.1016/j.fcr.2024.109428.

SOULÉ, M. *et al.* Effect of crop management and climatic factors on weed control in sugarcane intercropping systems. *Field Crops Research*, v. 306, 2024.

TAKANO, H. K. *et al.* Época seca e textura do solo afetam o controle químico de *Senna obtusifolia* em cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Herbicidas*, v. 14, n. 3, p. 181, 2015.

VANOLLI, B. S. *et al.* Guia prático de plantas de cobertura: espécies, manejo e impacto na saúde do solo. In: CHERUBIN, M. R. (org.). Piracicaba: USP/ESALQ, 2024.

VERRET, V. *et al.* Can legume companion plants control weeds without decreasing crop yield? A meta-analysis. *Field Crops Research*, v. 204, p. 158–168, 2017. DOI: 10.1016/j.fcr.2017.01.010.

VIAUD, P. *et al.* Sugarcane yield response to legume intercropped: A meta-analysis. *Field Crops Research*, v. 295, 2023.

Capítulo 1

Uso de *Crotalaria spectabilis* na cana-de-açúcar em ciclo de cana planta após soja
Artigo a ser submetido à Revista Weed Control Journal
<https://www.weedcontroljournal.org/pt-br/>

3. CONSÓRCIO DE CANA-DE-AÇÚCAR COM *Crotalaria spectabilis*, EM CICLO DE CANA PLANTA APÓS SOJA

Luís Guilherme Pereira da Silva

Erika Cosendey Toledo de Mello Peixoto

Oriel Tiago Kölln

^{1*}Programa de Pós-Graduação em Produção Agropecuária Sustentável. Universidade Estadual do Norte do Paraná, Departamento de Agronomia, Bandeirantes (Paraná), Brasil. <https://orcid.org/0000-0002-6922-9618>. E-mail: luisgpereiradasilva@gmail.com

² Programa de Pós-Graduação em Produção Agropecuária Sustentável. Universidade Estadual do Norte do Paraná, Departamento de Agronomia, Bandeirantes (Paraná), Brasil. <https://orcid.org/0000-0002-9608-4282>. E-mail: emellopeixoto@uenp.edu.br

³ Programa de Pós-Graduação em Produção Agropecuária Sustentável. Universidade Estadual do Norte do Paraná, Departamento de Agronomia, Bandeirantes (Paraná), Brasil. <https://orcid.org/0000-0002-8507-9808>. E-mail: oriel.kolln@uenp.edu.br

* Autor para correspondência: oriel.kolln@uenp.br

4. INTRODUÇÃO

A sociedade passa por um processo de transição rumo a modelos econômicos que integram a sustentabilidade ambiental. O termo “green growth” adotado pela Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), engloba esse objetivo buscando conciliar o desenvolvimento econômico com a preservação ambiental e os benefícios dos serviços ecossistêmicos Habib *et al.* (2023). O Brasil, como potência agroexportadora responsável por 7% do comércio mundial de alimentos FAO (2022) apresenta papel importante nesta transição, especialmente em setores-chave como o sucroenergético.

O país é líder global na produção mundial de cana-de-açúcar, com volume de 677 milhões de toneladas na safra 2024/25, com o estado de São Paulo produzindo a maior parcela correspondente à 353,5 milhões de toneladas FAESP (2024).

A produtividade e a sustentabilidade do setor sucroenergético são influenciados por múltiplos fatores, incluindo condições climáticas, atributos do solo, manejo nutricional, incidência de pragas e doenças, bem como a interferência das plantas daninhas. Estas competem por recursos essenciais (luz, água e nutrientes), impactando direta e negativamente a produtividade e os custos de controle, além de dificultarem as operações de preparo do solo e colheita. Algumas espécies também apresentam alelopatia e atuam como hospedeira de pragas e doenças Almeida e Ferrão (2022). Portanto, seu manejo é imperativo.

O manejo dessas plantas na canavieira brasileira depende de medidas culturais, mecânicas, física e químicas. Contudo, o método que predomina ainda corresponde na aplicação de herbicidas sintéticos, principalmente em pré-emergência Favoreto; Christoffoleti e Borges (2023). Em raros momentos, são aplicados herbicidas de pós-emergência na entre linha da cana-de-açúcar, após a emergência das plantas daninhas Christoffoleti *et al.* (2004); Victoria Filho e Christoffoleti (2004).

O sucesso desta estratégia depende criticamente do efeito residual que deve assegurar o controle até o fechamento do dossel da cana. Nesta fase, a cultura assume o domínio competitivo sobre o ambiente, o sombreamento suprime a emergência e o desenvolvimento de novas plantas daninhas, enquanto seu sistema radicular consolida o monopólio sobre água e nutrientes. Contudo, a duração do residual é variável e influenciada por fatores edafoclimáticos (textura do solo, pH, precipitação pluvial e temperatura) e microbiológicos Victoria Filho e Christoffoleti (2004), que podem abreviar esse período, permitindo a germinação tardia e o estabelecimento de plantas daninhas.

Diante dessa limitação, se justifica a pesquisa por estratégias de manejo integrado

que combinem diferentes táticas sustentáveis. Assim, a consorciação da cana-de-açúcar com plantas de cobertura surge como prática agroecológica promissora, capaz de contribuir com a supressão de plantas daninhas, favorecer a ciclagem de nutrientes, a produtividade e a melhoria dos serviços ecossistêmicos Lima Filho *et al.* (2023a).

Estudos em sistemas consorciados têm demonstrado que a introdução de leguminosas de cobertura pode não afetar a produtividade da cana-de-açúcar, com resultados frequentemente equivalentes aos do cultivo solteiro Kaur; Bhullar; Gill (2016); Raza *et al.* (2024). No entanto, os efeitos são variáveis e dependem de fatores como a espécie de cobertura, a época de semeadura e as condições edafoclimáticas Viaud *et al.* (2023); Verret *et al.* (2017); Soulé *et al.* (2024).

Consórcio na cultura da cana de açúcar é adotado desde o século XVII, principalmente no momento de implantação dos canaviais de pequena escala, em países como Ilhas Maurícius, Nigéria e Índia Lima Filho *et al.* (2023a). No Brasil, no início do PROALCOOL, houve estímulo à produção de feijão consorciado ao canavial recém implantado, contudo, é um tema que necessita de maiores estudos, visto que muitas pesquisas apresentaram resultados contraditórios quanto à produtividade da cana ou foram obtidos na época que ainda se permitia a queima da cana Bolonhezi (2023).

Entre as espécies utilizadas, *Crotalaria spectabilis* é uma leguminosa que se destaca pela sua grande produção de fitomassa; grande reciclagem de nutrientes (N e K); elevado aporte de nitrogênio no sistema; descompactação por meio de suas raízes; supressão e redução de plantas daninhas. Além disso, sua ação supressiva sobre nematóides e sua altura média, evita a competição com a cana de açúcar Lima Filho *et al.* (2023a).

Para otimizar o manejo, a integração da crotalária com a aplicação de herbicidas em dose reduzida pode representar abordagem sustentável, pois busca conciliar os benefícios da cobertura viva com a eficácia do controle químico sem comprometer a seletividade à cultura. No entanto, a viabilidade desta prática depende da seletividade dos herbicidas à leguminosa. Informações sobre a seletividade de herbicidas para adubos verdes são escassas, sendo a crotalária uma das poucas espécies com alguns estudos Braz *et al.* (2015).

Estudos tem demonstrado que a seletividade do clomazona para *C. spectabilis* é alta, mesmo em doses elevadas Dias *et al.* (2017); Braz *et al.* (2015). No entanto, para o sulfentrazone, a seletividade é mais restrita, com relatos de fitotoxicidade em doses superiores a 150 g i.a. ha⁻¹ Braz *et al.* (2017). Ainda assim, a combinação de ambos os herbicidas em doses reduzidas, visando o controle de plantas daninhas em consórcio com a crotalaria, carece de recomendação técnica baseada em evidência comprovadas, além de registro para

essa finalidade específica Lima Filho *et al.* (2023a).

O presente trabalho teve como objetivo avaliar o consórcio de *Crotalaria spectabilis* com a cana de açúcar, associado à aplicação de herbicidas em doses reduzidas no ciclo de cana-planta, quanto à supressão de plantas daninhas, à seletividade da leguminosa aos herbicidas e o impacto sobre a produtividade da cana-de-açúcar.

Desta forma, o presente trabalho testa as seguintes hipóteses: i) o consórcio entre *Crotalaria spectabilis* e cana de açúcar, suprime a comunidade de plantas daninhas, reduzindo a diversidade e biomassa total em comparação ao manejo químico; ii) a aplicação de herbicidas em subdoses é seletiva para *Crotalaria spectabilis*, não afetando significativamente seu estabelecimento e acumulação de biomassa; iii) a produtividade, as características morfológicas e a qualidade industrial da cana de açúcar em consórcio não diferem da obtida no sistema sem consórcio.

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1. ÁREA EXPERIMENTAL

O estudo foi realizado no período de maio de 2024 até maio de 2025, na Fazenda Santa Rosa localizada no município de Chavantes, estado de São Paulo, coordenadas geográficas correspondem à longitude 49° 43' 9.125"O, latitude 23° 1' 13.189"S e altitude aproximada de 520 m.

O clima da região, segundo a classificação de Köppen (Alvares *et al.*, 2014), é do tipo Cfa (subtropical úmido), caracterizado por verões quentes, ausência de estação seca definida e precipitação bem distribuída ao longo do ano, com temperaturas médias anuais entre 16° e 22°C.

Utilizando pluviômetro, foi realizado o monitoramento da pluviosidade da chuva desde a instalação (05/2024) até a colheita (05/2025). Os índices de precipitação mensal foram organizados na Figura 1 - Índice pluviométrico mensal coletado e da média histórica para o período no município de Chavantes - SP.

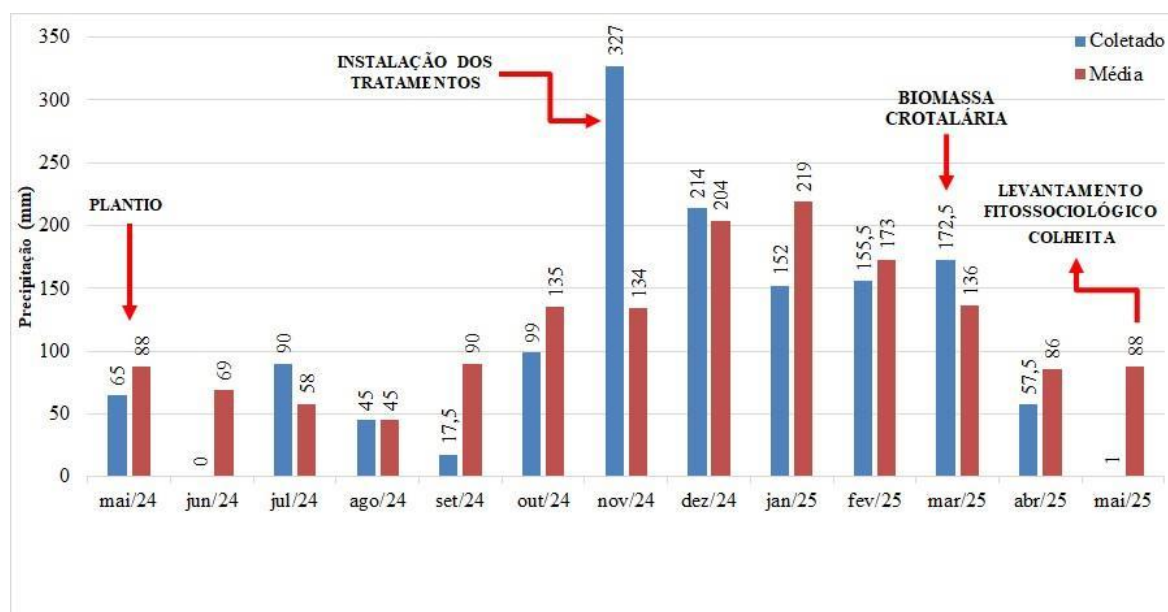


Figura 1 - Índice pluviométrico mensal coletado e da média histórica para o período no município de Chavantes - SP

O experimento foi instalado em solo classificado como Latossolo Vermelho distrófico, de textura muito argilosa (168 g kg⁻¹ de areia, 207 g kg⁻¹ de silte e 625 g kg⁻¹ de argila), em um talhão de cana-de-açúcar da variedade RB966928, no estágio de cana-planta, com espaçamento simples de 1,50 m entrelinhas. Os resultados da análise química do solo

para as camadas de 0-20 cm e 20-40 cm, são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Resultados da análise química do solo nas camadas de 0-20 cm e 20-40 cm

	Parâmetro	Unidade	Camada 0-20 cm	Camada 20-40 cm
pH (CaCl ₂)	Potencial Hidrogeniônico	-	5,5	5,1
H ⁺ + Al ³⁺	-	mmol _c dm ⁻³	28	41
C	Carbono Orgânico	g dm ⁻³	12	10
M.O.	Matéria Orgânica	g dm ⁻³	21	18
P	Fósforo	mg dm ⁻³	11	10
K	Potássio	mmol _c dm ⁻³	1,6	0,6
Ca	Cálcio	mmol _c dm ⁻³	57	45
Mg	Magnésio	mmol _c dm ⁻³	11	8
CTC	Capac. Troca de cátions	mmol _c dm ⁻³	97,6	94,6
V%	Saturação por base	%	71,3	56,7
S	Enxofre	mg dm ⁻³	8	9
Cu	Cobre	mg dm ⁻³	3,5	-
Zn	Zinco	mg dm ⁻³	1,0	-
Fe	Ferro	mg dm ⁻³	14,6	-
Mn	Manganês	mg dm ⁻³	23,4	-
B	Boro	mg dm ⁻³	0,28	-

5.2. IMPLANTAÇÃO DOS TRATAMENTOS

5.2.1. Histórico da área experimental

A área experimental foi cultivada com cana-de-açúcar por sete anos consecutivos. Em 2021, o talhão foi reformado por meio das operações de gradagem, subsolagem e niveladora, visando à renovação da área. Na sequência, foi implantada a cultura da soja no período do verão e para o inverno mix de cobertura, que permaneceu na área nos ciclos de 2021, 2022 e 2023. Em 2024, a cana-de-açúcar foi plantada, dando início ao experimento.

Após a reforma da área em 2021, realizou-se dessecação com glyphosate em outubro, seguida da semeadura da soja. Em dezembro do mesmo ano, aos 60 dias após a semeadura, foi aplicado novamente glifosato. Em março de 2022, a área recebeu a semeadura de um mix de plantas de cobertura composto por milheto (*Pennisetum glaucum*), trigo mourisco (*Fagopyrum esculentum*), ervilhaca (*Vicia sativa*), centeio (*Secale cereale*) e nabo forrageiro

(*Raphanus sativus*).

Na safra 2022/2023, a soja foi semeada em novembro de 2022. Antes da semeadura, realizou-se dessecação com glifosato e 2,4-D. Aos 45 dias após a semeadura, foi aplicado glifosato e *haloxyfop-R-methyl* para controle de plantas daninhas em pós-emergência. Em março de 2023, após a colheita da soja, foi semeado novo mix de cobertura, contendo trigo mourisco, milheto e centeio.

Em outubro de 2023, adotou-se o sistema "plante e aplique", para a cultura da soja, com aplicação de glifosato, clomazone e diclosulam. Após a colheita da soja, realizada em março de 2024, foi feito o plantio da cana-de-açúcar em abril do mesmo ano. Antes do plantio da cana, realizou-se uma aplicação adicional de glifosato em abril de 2024 para eliminação de plantas daninhas em pós-emergência.

Em todos os ciclos de inverno, as plantas de cobertura foram manejadas por meio de um rolo destorreador, promovendo o acamamento da massa vegetal sobre a superfície do solo.

5.2.2. Delineamento experimental

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, formado por cinco repetições com cinco tratamentos, totalizando 25 unidades experimentais. Cada unidade experimental consistiu em 7,50 m de largura (equivalente a 5 linhas de cana de açúcar) por 8 m de comprimento, totalizando 60 m². A área total do experimento foi de 1.500 m².

5.2.3. Tratamentos e doses aplicadas

Os tratamentos foram: T1) plantio de *Crotalaria spectabilis* na entrelinha da cana de açúcar sem aplicação de herbicida (*C. spectabilis*); T2) aplicação de herbicida pré-emergente com dose máxima de bula (HPEM); T3) herbicida pré-emergente com dose reduzida (HPEm); T4) semeadura de *Crotalaria spectabilis* na entrelinha da cana de açúcar com aplicação de herbicida pré-emergente com dose reduzida (*C. spectabilis* + HPEm) e T5) tratamento controle sem capina e sem herbicida.

Os herbicidas utilizados foram os produtos comerciais Gamit Star® (800 g L⁻¹ de clomazone) e Boral® (500 g L⁻¹ de sulfentrazone). As doses aplicadas corresponderam a 940 mL ha⁻¹ de Gamit Star® (equivalente a 752 g i.a. ha⁻¹ de clomazone) e 350 mL ha⁻¹ de Boral® (equivalente a 175 g i.a. ha⁻¹ de sulfentrazone) para os tratamentos com dose reduzida (HPEm), e 1.500 mL ha⁻¹ de Gamit Star® (1.200 g i.a. ha⁻¹) e 1.600 mL ha⁻¹ de

Boral® (800 g i.a. ha⁻¹) para o tratamento com dose máxima (HPEM). A semeadura da *Crotalaria spectabilis* nos tratamentos T1 e T4 foi realizada na dose de 31,30 kg ha⁻¹ de sementes.

5.2.4. Implantação da cultura e condução do experimento

O plantio da cana-de-açúcar foi realizado dia 28 de abril de 2024, em sistema mecanizado, utilizando-se esparramadeira (distribuidora de toletes) para a deposição da cana-de-açúcar no sulco. Utilizou-se a variedade RB966928, com densidade de plantio de 18 a 22 gemas por metro linear no espaçamento entrelinhas de 1,50 m. A adubação de plantio foi realizada com o fertilizante organomineral Fort-Phos 1306 (01-23-06)¹, da empresa Brasfértil, na dose de 690 kg ha⁻¹.

Na cobertura das mudas de cana-de-açúcar foi utilizada na calda de aplicação: *Bacillus velezensis*, *B. amyloliquefaciens*, *B. subtilis*, *B. thurigiensis*, *Beauveria bassiana*, *Metarhizium anisopliae*, *Azospirillum brasilense*, *Trichoderma harzianum* e Nutry Cana® da Union Agro.

No mesmo dia, foi realizada aplicação dos herbicidas pré-emergentes, utilizando os produtos comerciais Provence Total® (37.50 g ha⁻¹ i.a. de indaziflam e 112 g ha⁻¹ i.a. de isoxaflutole) e Boral® (650 g ha⁻¹ i.a. de sulfentrazona), na taxa de aplicação de 150 L ha⁻¹.

Em novembro de 2024 foi realizada o procedimento técnico conhecido popularmente como quebra lombo, objetivando corrigir as irregularidades/elevações do solo oriundas da abertura dos sulcos que se formam nas entrelinhas, resultando em um solo aplainado, onde o excesso de terra foi distribuído e torrões são desmanchados.

Neste momento foi instalado o experimento com a demarcação dos blocos e a aplicação dos tratamentos apresentados anteriormente. A semeadura da *Crotalaria spectabilis* foi realizada à lanço nas entrelinhas do canavial. Previamente, o solo foi revolvido com auxílio de enxada, para destorroamento e preparo do leito de semeadura. Em seguida, as sementes foram distribuídas manualmente à lanço sobre a superfície do solo e, cobertas com uma camada de 1 a 2 cm de terra, utilizando a lâmina da enxada para incorporá-las.

As aplicações dos herbicidas foram realizadas em pré-emergência, imediatamente após a semeadura da *Crotalaria spectabilis*. Utilizou-se um pulverizador costal elétrico, equipado com uma barra de 2 metros, com quatro bicos equipados com pontas de jato plano (modelo XR 11002), espaçados em 50 cm, a uma velocidade de deslocamento de 5,0 km h⁻¹, e pressão de 30 psi (2 bar) e taxa de aplicação de 156 L ha⁻¹.

5.3. AVALIAÇÃO DA BIOMASSA E NUTRIENTES DA *Crotalaria spectabilis*

Em março de 2025, foi realizado o levantamento da biomassa de *Crotalaria spectabilis*, no T1 (Crotalaria) e T4 (Crot + HPEm). A amostragem seguiu o método do quadrado inventário Braun-blancquet (1979). Dessa forma, um quadrado vazado de dimensões de 0.50 m x 0.50 m foi lançado duas vezes, aleatoriamente para cada tratamento, totalizando área amostral de 0.5 m² por tratamento e 1.250 m² para cada bloco. Para as avaliações foram desconsideradas 1.5 m de bordadura.

Dentro de cada quadrado, as plantas de crotalaria foram contabilizadas e cortadas rente ao solo, utilizando-se tesoura. O material foi acondicionado em sacos de papel e seco em estufa de ventilação forçada de ar à 60°C por 72 horas. Após a secagem, a massa seca foi determinada em balança com precisão. As amostras foram, trituradas em moinho tipo Wiley, acondicionadas em recipientes de acrílico e submetidas à análise de avaliação nutricional de macro e micro nutrientes de acordo com metodologia Malavolta; Vitti; Oliveira (1997).

A análise estatística foi realizada utilizando o software R (versão 4.3.1). Os dados foram submetidos à análise de covariância (ANCOVA) com o número de plantas como covariável. Optou-se pela análise de covariância em detrimento do teste t de Student, pois a inclusão do número de plantas como covariável permitiu controlar estatisticamente a influência da densidade de plantas na biomassa, aumentando a precisão das estimativas e o poder do teste.

A verificação dos pressupostos de normalidade dos resíduos e homocedasticidade foi realizada mediante teste de Shapiro-Wilk e análise gráfica, respectivamente. Foi utilizado teste de hipóteses do tipo III. As comparações entre médias dos tratamentos foram realizadas pelo método de comparação de médias ajustadas. Foi adotado nível de significância de 5%.

5.4. LEVANTAMENTO FITOSSOCIOLÓGICO E ANÁLISE DA BIOMASSA DAS PLANTAS DANINHAS

Em maio de 2025, foi conduzido o levantamento fitossociológico da comunidade infestante nos cinco tratamentos. Para este levantamento, adotou-se a mesma metodologia de amostragem por quadrado inventário (0,50 m x 0,50 m) descrita no item 5.3, com as seguintes adaptações: o quadrado foi lançado por 12 vezes por tratamento, totalizando 3 m² por tratamento.

Foram avaliados o número total de plantas daninhas e a biomassa total coletada por

parcela. As plantas daninhas dentro de cada quadrado foram identificadas, classificadas, contabilizadas *in loco*, e posteriormente coletadas por corte rente ao solo. O procedimento de secagem em estufa (60°C por 72 horas) foi mantido para a determinação da massa seca da comunidade infestante.

Os dados de identificação, contagem e massa seca das plantas daninhas, foram compilados para duas análises distintas. Primeiramente, para avaliar a eficácia de supressão de cada tratamento, os dados de biomassa seca total (g m^{-2}) e de densidade de plantas (indivíduos m^{-2}) foram submetidos a análise estatística não-paramétrica (devido a violação dos pressupostos de normalidade e homocedasticidade). Aplicou-se o teste de Kruskal-Wallis, seguido pelo teste post-hoc de Conover com correção de Holm para comparações múltiplas ($\alpha = 0,05$), permitindo identificar quais tratamentos diferiram significativamente na quantidade e no volume de infestação.

Além da análise não-paramétrica, foi realizada análise adicional da frequência de infestação para reforçar os resultados em relação à presença de tratamentos com controle absoluto (variância zero). Para isso, os dados de biomassa foram transformados em uma variável binária (presença ou ausência de plantas daninhas) e analisados por meio do teste exato de Fisher, que examina a relação entre o tratamento e a ocorrência de infestação. Além disso, foi realizada análise condicional restrita às parcelas infestadas para verificar se a intensidade da biomassa varia entre os tratamentos quando a infestação ocorre.

Em paralelo, os mesmos dados fundamentaram o cálculo dos parâmetros fitossociológicos: densidade absoluta (D_a) e relativa (D_r), frequência absoluta (F_a) e relativa (F_r), dominância absoluta (D_o) e relativa (D_{or}), valor de cobertura (V_c) e valor de cobertura relativo (V_{cr}), índice de importância (I) e índice de importância relativa (I_{lr}).

5.5. AVALIAÇÃO DA PRODUTIVIDADE, CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS E QUALIDADE INDUSTRIAL DA CANA-DE-AÇÚCAR

A colheita foi realizada em maio de 2025, seguindo a metodologia de (Nassif *et al.*, 2013) foram coletados 12 metros das três linhas centrais de cada parcela de cana de açúcar, descartando-se as bordaduras. Realizou-se a contagem do número total de canas e pesadas com todas as suas estruturas por meio de uma cédula de carga para a obtenção da massa fresca da amostra. Em seguida, foram selecionadas dez plantas representativas da massa fresca da amostra para avaliação do número de nós e da altura de colmo, que foi realizada utilizando fita métrica, medindo a distância do solo até a inserção da folha +1.

Também foi procedida análise da qualidade industrial realizada no laboratório da Assocana (Associação dos Plantadores e Fornecedores de Cana de Açúcar do Vale do Paranapanema), onde foram determinados os atributos tecnológicos do caldo, como: Açúcar Total Recuperável (ATR), Brix, Pol da Cana, Fibra e Total de Açúcar por hectare (TAH).

Foi realizada análise de variância para o delineamento em blocos casualizados, e as médias dos tratamentos, foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, após verificação das pressuposições de normalidade e homogeneidade de variâncias.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. RESPOSTA DA *Crotalaria spectabilis* NOS TRATAMENTOS T1 E T4: BIOMASSA E NUTRIENTES

A aplicação do herbicida pré-emergente em dose reduzida T4 (Crot+HPEm) promoveu incremento de 57% na produção de matéria seca da *Crotalaria spectabilis* (2.124 kg ha⁻¹) em relação ao tratamento sem herbicida (1.352 kg ha⁻¹).

Os resultados da análise de covariância (ANCOVA) demonstraram o efeito positivo do tratamento ($F_{1,13} = 13,27$; $p=0,003$), descartando a fitotoxicidade e indicando um estímulo ao crescimento (Tabela 2). O modelo, que incluiu o número de plantas como covariável significativa ($p=0.005$), explicou 80% da variação na biomassa.

Tabela 2 - Análise de covariância para biomassa de *Crotalaria spectabilis* nos tratamentos T1 (Crotalaria) e T4 (Crot + HPEm).

Fonte de variação	GL	SQ	QM	Valor F	Valor p
Tratamento	1	2001,63	2001,63	13,27	0,003
Bloco	4	2421,41	605,35	4,01	0,025
Número de plantas	1	1667,02	1667,02	11,05	0,005
Resíduo	13	1961,48	150,88		

Os valores absolutos de biomassa obtidos são inferiores aos relatados para o cultivo solteiro, que variam de 4 a 7 t ha⁻¹ Lima Filho *et al.* (2023a); Lima Filho *et al.* (2023b); Vanolli *et al.* (2024) Essa discrepância é provavelmente atribuída ao sombreamento imposto pelo dossel da cana-de-açúcar (70-90 cm) durante todo o ciclo de desenvolvimento da *Crotalaria spectabilis*, limitando o potencial produtivo. Resultados semelhantes foram observados por (Dantas *et al.*, 2015), que também verificaram menor produção de massa seca em leguminosas consorciadas com cana de açúcar comparadas ao cultivo solteiro.

Em relação ao efeito dos herbicidas, tem sido documentado baixa fitotoxicidade e nenhuma redução na produção de matéria seca em doses de até 0,8 kg i.a. ha⁻¹ de clomazone Dias *et al.* (2017), e para doses de 1,5L ha⁻¹ até 12 L ha⁻¹ para o herbicida Reator® (Clomazone) Souza *et al.* (2023). Entretanto, doses acima de 150 g ha⁻¹ de sulfentrazone ocasionou fitotoxicidade e redução na produção de matéria seca Braz *et al.* (2015), sendo um elemento adicional de redução além do sombreamento.

O aumento significativo de biomassa da crotalaria no tratamento T4 (Crot + HPEm),

demonstrou a seletividade do herbicida, assim como efeito positivo. Este efeito não pode ser creditado ao controle de plantas daninhas, visto que o tratamento apresentou a maior infestação (Tabela 5). O herbicida pode ter atuado como agente bioestimulante para explicar este incremento produtivo inesperado. Moléculas de herbicidas em decomposição podem servir como fonte de carbono, estimulando seletivamente populações microbianas decompositoras, alterando a comunidade microbiana do solo, desencadeando um efeito de bioestimulação que beneficiou a crotalaria.

A literatura reporta que os efeitos dos pesticidas na microbiota do solo são complexos e específicos, podendo ser tanto inibitórios quanto estimulantes, dependendo do princípio ativo, da dose aplicada e do bioma microbiano residente Jeyaseelan *et al.* (2024); Hussain *et al.* (2009). O impacto imediato é governado pela toxicidade inerente do composto, que pode matar ou inibir grupos sensíveis de microrganismos. No entanto, linhagens resistentes ou adaptadas são capazes de metabolizar as moléculas do herbicida, utilizando-as como fonte de carbono e energia, o que resulta na estimulação seletiva de suas populações Jeyaseelan *et al.* (2024). Este processo de degradação pode, por sua vez, aumentar a respiração edáfica, um indicador direto de atividade microbiana, à medida que a comunidade microbiana consome a nova fonte de carbono Hussain *et al.* (2009).

Especificamente, a sulfentrazone pode elevar as populações totais de bactérias e fungos Martinez *et al.* (2008). Este fenômeno é atribuído ao alto potencial de degradação de certas linhagens microbianas, que são capazes de utilizar até mesmo altas concentrações do herbicida ($7,0 \mu\text{g mL}^{-1}$) como sua única fonte de carbono. De forma complementar, o clomazone na dose recomendada não afeta negativamente a microbiota do solo, sendo sua degradação essencialmente microbiana e compatível com a manutenção da atividade biológica do solo Mervosh *et al.* (1995); Du *et al.* (2018). Além disso, a aplicação de alguns herbicidas pode reduzir a diversidade microbiana geral, mas também aumentar a diversidade funcional e a cooperação entre fungos no complexo da rizosfera, conforme observado para mesotrione, nicosulfuron e atrazine Jeyaseelan *et al.* (2024).

O maior volume de biomassa no tratamento T4 (Crot + HPEm) resultou em um aporte total significativamente maior de nutrientes ao sistema, embora sua concentração na matéria seca não tenha diferido ($p > 0,05$).

Tabela 3 - Quantidade de macronutrientes por hectare de *Crotalaria spectabilis* para o tratamento T1 (Crotalaria) e T4 (Crotalaria + HPEm)

Tratamento	Matéria seca (t ha ⁻¹)	N	P	K	Ca	Mg	S
(kg ha ⁻¹)							
T1) Crotalaria	1.352	34,0	2,0	29,0	16,5	2,7	2,9
T4) Crotalaria + Herbicida	2.124	51,5	3,4	40,7	27,3	4,7	4,0
Diferença	772	17,5	1,3	11,7	10,8	2,0	1,1
Aumento %	57,10	51,4	64,2	40,2	65,5	74,4	36,4

O aumento do acúmulo de nutrientes, variou entre 36,4% e 74,4% para os macronutrientes (Tabela 3) e entre 37,5% e 59,6% para os micronutrientes (Tabela 4). Destacam-se os aumentos de 74,4% no magnésio e 65,5% no cálcio. Os teores dos nutrientes observados em kg ton⁻¹ para o tratamento T1 (Crotalaria) e T4 (Crot + HPEm), estão alinhados com a faixa reportada para a cultura Lima Filho *et al.* (2023b).

Tabela 4 - Quantidade de micronutrientes por hectare de *Crotalaria spectabilis* para o tratamento T1 (Crotalaria) e T4 (Crotalaria + HPEm)

Tratamento	Matéria seca (t ha ⁻¹)	Fe	Mn	Zn (g ha ⁻¹)	B	Cu
T1) Crotalaria	1.352	2174,0	67,0	39,4	77,1	15,1
T4) Crotalaria + HPEm	2.124	3261,0	92,1	54,5	112,3	24,1
Diferença	772	1087,0	25,1	15,1	35,2	9,0
Aumento %	57,10	50,0	37,5	38,3	45,7	59,6

A análise da concentração nutricional na biomassa revelou que não houve diferenças estatisticamente significativas ($p > 0,05$), entre os tratamentos para nenhum dos macros e micronutrientes avaliados. Este resultado indica que o herbicida não interferiu no metabolismo nutricional da planta.

6.2. DINÂMICA E SUPRESSÃO DA COMUNIDADE INFESTANTE

A comunidade de plantas daninhas apresentou níveis gerais de baixíssima infestação. A análise não-paramétrica revelou diferenças significativas entre tratamentos para biomassa (Kruskal-Wallis; $\chi^2 = 11.07$; $p=0,026$) e número de plantas ($\chi^2 = 10,67$; $p=0,031$).

Os tratamentos com herbicida isolado T2 (HPEM) e T3 (HPEm) foram os mais eficazes, resultando em ausência total de plantas daninhas com densidade, frequência e dominância iguais a zero (Tabela 5). A ausência de diferença entre a dose plena e a reduzida ($p=0,50$) demonstra que ambas foram igualmente eficazes para o controle nas condições de estudo.

Tabela 5 - Índices fitossociológicos da comunidade de plantas daninhas

Tratamento	Espécies	Densidade (ind./m ²)	Frequência (%)	Dominância (g/m ²)	(IVI)*
T1) Crotalaria	<i>Senna obtusifolia</i>	0,07	6,7%	0,29	300%
T2) HPEM	-	0,00	0,0%	0,00	0%
T3) HPEm	-	0,00	0,0%	0,00	0%
T4) Crotalaria + HPEm	<i>Senna obtusifolia</i>	0,27	26,7%	0,97	300%
T5) Controle	<i>Phyllanthus niruri</i>	0,07	6,7%	0,08	300%

* Índice de Valor de Importância.

Embora o tratamento T4 (Crot + HPEm) tenha apresentado a maior infestação entre os tratamentos, com biomassa e número de plantas significativamente superiores aos dos herbicidas isolados ($p<0,05$), os níveis absolutos de infestação foram baixos: 0,27 plantas m⁻², o que equivale a aproximadamente 2.700 plantas ha⁻¹. Este valor representa um bom controle da comunidade infestante, com densidade populacional muito abaixo do limiar de dano econômico para a cultura da cana-de-açúcar. A crotalaria solteira também manteve níveis baixos de infestação, com densidade de 0,07 plantas m⁻², desempenho equivalente ao do “Controle” ($p=0,817$ para biomassa; $p=0,816$ para número de plantas).

No entanto, é importante considerar que o histórico da área experimental com três anos de rotação com soja, aplicações de herbicida e uso de plantas de cobertura pode ter reduzido significativamente o banco de sementes de plantas daninhas, influenciando os baixos níveis de infestação observados em todos os tratamentos. Assim, embora os

resultados indiquem que o consórcio com *Crotalaria spectabilis* não comprometeu o controle geral, a capacidade supressiva da leguminosa não pôde ser plenamente avaliada nas condições deste estudo.

Tabela 6 - Biomassa de plantas daninhas e significância estatística entre tratamentos de controle

Tratamento	Blocos Infestados	Biomassa (g/m ²)	Número de Plantas (ind./m ²)	Grupo de Significância*
T1) Crotalaria	2/5 (40%)	0,29 ab	0,07 ab	ab
T2) HPEM	0/5 (0%)	0	0,00 b	b
T3) HPEm	0/5 (0%)	0	0,00 b	b
T4) Crotalaria + HPEm	4/5 (80%)	0,97 a	0,27 a	a
T5) Controle	1/5 (20%)	0,08 ab	0,07 ab	ab

*Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Conover ($p > 0,05$). Teste de Fisher para frequência de infestação: $p = 0.035$

Para complementar a análise e verificar a qualidade dos resultados diante da presença de tratamentos com controle absoluto (variância zero), foi realizada análise adicional de frequência de infestação. O teste exato de Fisher confirmou a associação significativa entre os tratamentos e a ocorrência de plantas daninhas ($p=0,035$). A análise focada apenas nas parcelas infestadas mostrou que, quando há infestação, a biomassa não varia entre os tratamentos (Kruskal-Wallis; $p=0,765$). Isso indica que o efeito dos tratamentos está na prevenção do surgimento de plantas daninhas, e não na redução da biomassa quando elas já estão estabelecidas. Os herbicidas funcionaram como barreira eficaz à emergência, enquanto os tratamentos com crotalária, embora tenham reduzido a infestação, não a eliminaram por completo.

A análise fitossociológica (Tabela 5) esclarece a natureza seletiva dessa infestação. A comunidade no tratamento T4 (Crot+HPEm) foi composta somente por *Senna obtusifolia* (IVI = 300%), que apresentou a maior densidade (0,27 ind. m⁻²) e dominância (0,97 g m⁻²). A crotalária solteira também abrigou exclusivamente *Senna obtusifolia*, porém em densidade quatro vezes menor, enquanto o “Controle” foi dominado por *Phyllanthus niruri*. Esse padrão sugere que a crotalária exerceu supressão seletiva, eliminando espécies sensíveis, mas favorecendo indiretamente espécies tolerantes como *S. obtusifolia*.

Estes resultados permitem observar que a crotalária solteira e o consórcio T4 (Crot+HPEm) de fato suprimiram a infestação a níveis gerais muito baixos, não diferindo estatisticamente do controle. No entanto, não houve equivalência com o manejo químico

isolado, que foi significativamente mais eficaz. Portanto, tem-se uma supressão geral parcial, porém com alta eficácia.

A emergência de *Senna obtusifolia* apenas nos tratamentos com semeadura de crotalaria (T1 e T4) resultou da convergência de vários fatores. A operação de quebra-lombo, realizada em novembro de 2024, promoveu o revolvimento profundo do solo, nivelando as entrelinhas e trazendo para a superfície sementes de *S. obtusifolia* que se encontravam em camadas mais profundas do banco de sementes. Este revolvimento foi complementando pelo preparo manual do solo para a semeadura da crotalaria, que, embora menos profundo, também contribuiu para a mobilização do banco de sementes. Estudos demonstram que sementes de *Senna obtusifolia* emergiram em todas as condições de luminosidade e profundidade (0,5 cm e 12 cm) em um período entre 4 e 6 dias Marques *et al.* (2023).

O surgimento de *Phyllanthus niruri* no controle (T5) seguiu uma dinâmica distinta, associada à germinação a partir do banco superficial, não tendo sido observado nos demais tratamentos devido à supressão exercida pela crotalaria ou pelos herbicidas.

A tolerância de *S. obtusifolia* ao sulfentrazone contribuiu para o escape da espécie no tratamento T4 (Crot + HPem). A dose utilizada (175 g i.a. ha⁻¹) situou-se na faixa de ineficiência para o controle desta espécie, que exige doses superiores a 300 g ha⁻¹ para controle eficaz em campo Takano *et al.* (2015). Dayan; Weete; Hancock (1996) obtiveram controle de 90% com 500 g i.a. ha⁻¹ e 100%, com 2000 g i.a. ha⁻¹, respectivamente. Em contraste, Araújo *et al.* (2018) utilizando doses de 600 g i.a. ha⁻¹ verificaram controle de emergência de 53.3% e 65.8%, enquanto Norsworthy (2004) obteve controles entre 11% e 50% com doses entre 105 g i.a. ha⁻¹ e 210 g i.a. ha⁻¹.

Além disso, a baixa disponibilidade do sulfentrazone em solo ácido (pH 5,5) pode ter atenuado ainda mais seu efeito. Como ácido fraco (pKa = 6,5), a molécula encontra-se predominantemente protonada neste pH, forma que, embora mais lipofílica (facilita a absorção pelas raízes), tem maior afinidade por adsorver aos colóides do solo, especialmente à matéria orgânica Gehrke; Camargo; Avila (2020). Essa sorção induzida pelo solo ácido atua como reservatório, diminuindo a concentração ativa na solução do solo.

Paralelamente, a dose de clomazone em T4 (Crot + HPem) (752 g i.a. ha⁻¹), também pode não ter atingido o limiar de controle. Araújo *et al.* (2018) observaram que, individualmente, o clomazone a 1,0 kg i.a. ha⁻¹ proporcionou 78% de controle da emergência e 77,4% de controle de plantas. Embora Takano *et al.* (2015) tenham relatado controle eficaz com doses de clomazone em 0,5 e 1,0 kg i.a. ha⁻¹, é reconhecido que a eficácia herbicida é altamente influenciada por fatores edafoclimáticos e de manejo.

Outro fator foi a presença da crotalária, leguminosa fixadora de nitrogênio, que criou pontos com maior concentração nitrogeno na rizosfera de *S. obtusifolia*, esta que também é uma leguminosa responsiva ao N, teve seu crescimento estimulado nesses microambientes. Assim, *S. obtusifolia* beneficiou-se de um ambiente onde a crotalária suprimiu outras plantas daninhas, criando uma interação sinérgica que favoreceu seu desenvolvimento.

Portanto, a crotalária, isolada ou em associação, promove uma supressão geral com infestação muito baixa, mas a integração com herbicida em dose reduzida pode falhar seletivamente no controle de espécies tolerantes, não atingindo a supressão total e equivalência dos herbicidas isolados.

Esse resultado ressalta que a eficácia de sistemas consorciados embora reduza a cobertura do solo por plantas daninhas, frequentemente depende de um manejo integrado complementar, como aumento de 86% nas capinas manuais Soulé *et al.* (2024). Esse dado revela que a supressão proporcionada pela planta de cobertura é parcial e necessita de complementação para atingir níveis de controle satisfatórios.

6.3. PRODUTIVIDADE, CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS E QUALIDADE INDUSTRIAL DA CANA-DE-AÇÚCAR

As diferentes estratégias de manejo de plantas daninhas não influenciaram significativamente o desenvolvimento, a produtividade ou qualidade industrial da cana-de-açúcar (Tabela 7 e Tabela 8). A produtividade manteve-se estatisticamente uniforme (101,8 a 114,2 t ha⁻¹), assim como os parâmetros morfológicos (altura, número de nós e de colmos) e tecnológicos avaliados, incluindo o ATR (147,7 a 151,8 kg t⁻¹) e o TAH (15,22 a 17,19 kg t⁻¹). Os coeficientes de variação (CV) inferiores a 15,8% para as variáveis produtivas e 5,5% para os atributos de qualidade atestaram a precisão experimental.

Tabela 7 - Médias de variáveis morfológicas e de produtividade da cana-de-açúcar submetida a diferentes manejos de plantas daninhas

Tratamentos	Altura (m) ¹	Nós (un) ¹	Canas (un) ¹	Produt. (t ha ⁻¹) ¹
T1) Crotalaria	2,65	21,6	128,2	101,8
T2) HPEM	2,53	20,4	139,4	110,3
T3) HPEm	2,53	20,8	126,2	109,7
T4) Crot + Herb	2,50	20,0	124,6	114,2
T5) Controle	2,53	20,8	127,6	109,1
CV* (%)	4,8	4,8	15,8	8,4
Valor-p	0,332	0,181	0,797	0,342

¹Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

*CV = Coeficiente de Variação.

Esta uniformidade de resposta demonstra que, nas condições deste estudo, a produtividade da cana-de-açúcar consorciada não diferiu da obtida no sistema sem consórcio. A cana-planta mostrou-se equivalente ao tratamento controle, mesmo adotando diferentes estratégias de manejo.

Tabela 8 - Médias de variáveis de qualidade industrial da cana-de-açúcar submetida a diferentes manejos de plantas daninhas

Tratamentos	ATR (kg t ⁻¹) ¹	BRIX (%) ¹	Fibra (%) ¹	Pol Cana (%) ¹	TAH (kg t ⁻¹)
T1) Crotalaria	149,8	19,71	11,04	15,07	15,22
T2) HPEM	151,8	19,98	11,04	15,27	16,74
T3) HPEm	147,7	19,61	11,40	14,84	16,20
T4) Crot + Herb	150,8	19,85	11,09	15,17	17,19
T5) Controle	150,3	19,85	11,15	15,11	16,41
CV* (%)	2,8	2,2	2,2	3,1	7,59
Valor-p	0,643	0,708	0,147	0,687	0,186

¹Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Daros *et al.* (2010) descrevem a RB966928 como uma cultivar de maturação precoce a média, com alta produtividade de colmos (108 t ha⁻¹ em média de quatro ciclos) e elevado teor de sacarose, recomendada para ambientes de fertilidade média a alta. No presente estudo, independentemente dos tratamentos de manejo de plantas daninhas, a produtividade da cana variou entre 101,8 e 114,2 t ha⁻¹, demonstrando que a cultivar manteve seu potencial produtivo mesmo sob diferentes estratégias de manejo, incluindo o consórcio com *Crotalaria spectabilis* e a aplicação de herbicidas em dose reduzida.

Arcoverde *et al.* (2019) obtiveram para a mesma cultivar produtividades de 158,5 a 175,0 t ha⁻¹ no ciclo de cana-planta, dependendo do sistema de preparo do solo. No entanto, esses autores realizaram a colheita aos 395 dias após o plantio (DAP), enquanto o presente estudo colheu aos 365 DAP. Essa diferença de aproximadamente 30 dias no ciclo pode explicar, em parte, os maiores valores de produtividade observados. Além disso, deve-se considerar que a área experimental de Arcoverde *et al.* (2019) havia sido cultivada por 14 anos com soja e milho sob sistema de plantio direto antes da implantação da cana, enquanto

no presente estudo o histórico de cultivo foi de apenas três anos. Essa condição prévia de longo término sob plantio direto pode ter contribuído para melhores atributos físicos do solo e, conseqüentemente, para o maior potencial produtivo observado pelos autores.

No que se refere à qualidade industrial, Daros *et al.* (2010) reportaram para a RB966928 valores de Pol da cana variando entre 13,63 e 14,13% nos diferentes ciclos de cultivo. Arcoverde *et al.* (2019) observaram teores de Pol variando entre 15,20 e 15,63% e Brix entre 16,8 e 16,9%. Os valores obtidos no presente estudo para Pol foram de 14,84 a 15,27% e para Brix de 19,61 a 19,98%. Esses resultados demonstram que os diferentes manejos testados, incluindo com a *Crotalaria spectabilis* e a aplicação de herbicidas em dose reduzida, não comprometeram a qualidade industrial da cana-de-açúcar. Particularmente, os valores de Brix observados neste estudo foram superiores aos reportados por (Arcoverde *et al.*, 2019), o que demonstra elevado teor de sólidos solúveis no caldo da cana e indica um bom potencial tecnológico da cultivar nas condições do experimento.

Adicionalmente, os valores de fibra obtidos no presente estudo (11,04 a 11,40%) estão próximos aos reportados por Daros *et al.* (2010) para a RB966928 (10,89 a 12,07%) e por Arcoverde *et al.* (2019) (11,6 a 12,0%), indicando que os diferentes manejos não comprometeram a qualidade da biomassa para fins industriais.

O ATR (Açúcar Total Recuperável), que no presente estudo variou de 147,7 a 151,8 kg t⁻¹, também se mostrou consistente com os valores reportados por Daros *et al.* (2010), que podem ser convertidos para a faixa de 137,4 a 156,6 kg Mg⁻¹, e com os valores observados por Arcoverde *et al.* (2019), que reportaram de 151,1 a 154,2 kg Mg⁻¹ para a mesma cultivar.

Em conjunto, os resultados demonstram que a variedade RB966928 manteve seu potencial produtivo e qualidade industrial independentemente do manejo de plantas daninhas adotado.

Esses resultados alinham-se com estudos que reportam produtividades equivalentes em consórcio como de Raza *et al.* (2024) e Kaur; Bhullar; Gill (2016), e com metanálises que indicam efeito geral não significativo para consórcio entre diversas culturas Verret *et al.* (2017). Embora, variações de aumento ou reduções significativas também possam ocorrer Viaud *et al.* (2023). Os resultados reforçam a ideia de que os benefícios não são universais e dependem de interações específicas entre as espécies e o ambiente.

A ausência de efeito significativo da crotalária sobre a produtividade da cana-de-açúcar demonstra que, nas condições deste estudo, o consórcio não interferiu no desenvolvimento da cultura principal. Os benefícios esperados da leguminosa não se

manifestaram em magnitude suficiente no primeiro ciclo da cana-planta, período em que a cultura ainda está em fase de estabelecimento e as interações competitivas com a planta de cobertura podem ser limitadas.

7. CONCLUSÕES

Quanto à hipótese de que o consórcio suprime a comunidade de plantas daninhas, e os resultados demonstram que a estratégia é eficaz. A crotalaria solteira e sua associação com herbicida em dose reduzida T4 (Crot+HPEm) proporcionaram controle geral eficaz, com infestação extremamente baixa (densidade $\leq 0,27$ plantas m^{-2}). No entanto, é importante reconhecer que o histórico da área experimental, com rotação de soja, aplicação de herbicidas e uso de plantas de cobertura nos três anos posteriores, pode ter reduzido significativamente o banco de sementes de plantas daninhas, influenciando os baixos níveis de infestação observados. Assim, embora os resultados indiquem que o consórcio não comprometeu o controle geral, a capacidade supressiva da crotalaria não pôde ser plenamente avaliada nas condições deste estudo, sendo necessários experimentos adicionais em áreas com maior pressão de infestação para confirmar esse potencial.

Em relação à hipótese de que a dose reduzida de clomazone (752 g i.a. ha^{-1}) e sulfentrazone (175 g i.a. ha^{-1}) é seletiva para *C. spectabilis*, os resultados corroboram plenamente a afirmação. O herbicida não afetou negativamente a emergência e o estabelecimento da leguminosa e, adicionalmente promoveu incremento de 57% na sua biomassa.

Por fim, confirma-se a hipótese de que a produtividade, as características morfológicas e a qualidade industrial da cana-de-açúcar não diferiram estatisticamente entre nenhum dos manejos testados e o tratamento controle sem consórcio. Este resultado demonstra que os potenciais benefícios da crotalaria (fixação de nitrogênio, ciclagem de nutrientes, melhoria do solo) não se manifestaram suficientemente para impactar a produtividade da cana no primeiro ciclo.

8. AGRADECIMENTOS

Gostaria de Agradecer o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

9. REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, E. I. B.; FERRÃO, G. E. (org.). Fundamentos em biologia e manejo de plantas daninhas. São Luís, EDUFMA, 2022, 215 p.
- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift, Berlin, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ARAÚJO, L. S. *et al.* Tolerância do fedegoso ao glyphosate e alternativas de controle. 2018, Anais.. Brasília, DF: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 2018. p. 1079: il. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br>. Acesso em: 24 maio 2016.
- ARCOVERDE, S. N. S. *et al.* Soil physical attributes and production components of sugarcane cultivars in conservationist tillage systems. Engenharia Agrícola, Jabotical, v. 39, n. 2, p. 216–224, 1 mar. 2019. Disponível em: Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v39n2p216-224/2019>
- BOLONHEZI, D. Soluções em engenharia e processos industriais. Stab: Açúcar, Álcool e Subprodutos, São Paulo, v. 41, n.3, jul. /ago. /set. 2023.
- BRAUN-BLANQUET, J. Fitosociología: bases para el estudio de las comunidades vegetales. Madrid: Blume, 1979.
- BRAZ, G. B. P. *et al.* Selection of herbicides targeting the use in crop systems cultivated with showy crotalaria. Planta Daninha, Viçosa, v. 33, n. 3, p. 521–534, 2015. Disponível em: 10.1590/S0100-83582015000300014
- BRAZ, G. B. P. *et al.* Alternativas para o controle químico de plantas voluntárias de crotalaria em diferentes modalidades de aplicação. Revista Brasileira de Herbicidas, Londria, v. 16, n. 2, p. 91, 2017.
- SOUZA, R. C. de *et al.* Selectivity of residual herbicides used in sugarcane crops for crotalaria species. Revista Científica da Faculdade de Educação e Meio Ambiente, [S. l], v. 14, n.2, p. 435-446, 2023. DOI: 10.31072/rcf.v14i2.1362. Disponível em: <https://revista.uni-faema.edu.br/index.php/Revista-FAEMA/article/view/1362>. Acesso em: 24 maio 2026.
- CHRISTOFFOLETI, P. J. *et al.* Manejo de Plantas Daninhas na Cultura da Cana-de-açúcar: Novas Moléculas Herbicidas. Sinal Verde, São Paulo, v. 10, n. 19, p. 8-9, set. 2004.
- DANTAS, R. A. *et al.* Produção de matéria seca e controle de plantas daninhas por leguminosas consorciadas com cana-de-açúcar em cultivo orgânico. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 50, n. 8, p. 681–689, 2015.
- DAROS, E. *et al.* RB966928 - early maturing sugarcane cultivar. Crop Breeding and Applied Biotechnology, v. 10, n.3, p. 278-281, 2010. Disponível em: <www.pmgca.ufpr.br>. Acesso em: 24 maio 2026.

DAYAN, F. E.; WEETE, J. D.; HANCOCK, H. G. Physiological basis for differential sensitivity to sulfentrazone by sicklepod (*Senna obtusifolia*) and coffee senna (*Cassia occidentalis*). *Weed Science*, v. 44, n. 1, p. 12-17, 1996.

DIAS, R. C. *et al.* Seletividade inicial de herbicidas aplicados em pós-emergência da crotalária. *Revista Brasileira de Herbicidas*, v. 16, n. 1, p. 76, 2017.

DU, P. *et al.* Clomazone influence soil microbial community and soil nitrogen cycling. *Science of the Total Environment*, v. 644, p. 475–485, 2018.

FAESP. Acompanhamento da safra 2025/26 de cana-de-açúcar Brasil São Paulo. São Paulo: FAESP, 2024.

FAO. Trade of agricultural commodities: FAOSTAT crops and livestock trade. Roma: FAO, 2022. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/TCL>. Acesso em: 24 maio 2026.

FAVORETO, L.; CHRISTOFFOLETI, P. J.; BORGES, Á. V. Desafios no manejo de plantas daninhas em cana-de-açúcar. *Informações Agronômicas: Proteção de Plantas*, n. 1, abr. 2023. Disponível em: <www.npct.com.br/IAProtecao>. Acesso em: 24 maio 2026.

GEHRKE, V. R.; CAMARGO, E. R.; AVILA, L. A. Sulfentrazone: environmental dynamics and selectivity. *Sociedade Brasileira da Ciência das Plantas Daninhas*, v. 38, 2020. DOI: 10.1590/S0100-83582020380100032.

HABIB, A. *et al.* Measuring green growth in agriculture: a comparative analysis of world economies. *Quality and Quantity*, v. 57, n. 6, p. 5491–5511, 2023.

HUSSAIN, S. *et al.* Impact of pesticides on soil microbial diversity, enzymes, and biochemical reactions. In: *Advances in Agronomy*. Academic Press, 2009. v. 102, p. 159-200

JEYASEELAN, A. *et al.* A review of the impact of herbicides and insecticides on the microbial communities. *Environmental Research*, v. 245, 2024. DOI: 10.1016/j.envres.2023.118020.

KAUR, N.; BHULLAR, M. S.; GILL, G. Weed management in sugarcane-canola intercropping systems in northern India. *Field Crops Research*, v. 188, p. 1–9, 2016. DOI: 10.1016/j.fcr.2016.01.009.

LIMA FILHO, O. F. *et al.*(org.). Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil. 2. ed., 2023. v.1.

LIMA FILHO, O. F. *et al.* (org.). Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil. 2. ed., 2023. v.2.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997.

MARQUES, R. F. *et al.* Emergence and development of weeds according to the sowing depth and light intensity. *Revista Caatinga*, v. 36, n. 3, p. 502–512, 2023.

MARTINEZ, C. O. *et al.* The effects of moisture and temperature on the degradation of sulfentrazone. *Geoderma*, v. 147, n. 1–2, p. 56–62, 2008. DOI: 10.1016/j.geoderma.2008.07.005.

MERVOSH, T. L. *et al.* Clomazone sorption in soil: Incubation time, temperature, and soil moisture effects. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 43, n. 8, p. 2295–2300, 1995. DOI: 10.1021/jf00056a017.

NASSIF, D. *et al.* Padrões mínimos para coleta de dados experimentais para estudos sobre crescimento e desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2013. 28 p. (Documentos / Embrapa Informática Agropecuária, ISSN 1677-9274, 127).

NORSWORTHY, J. K. Broadleaved weed control in wide-row soybean (*Glycine max*) using conventional and glyphosate herbicide programmes. *Crop Protection*, v. 23, n. 12, p. 1229–1235, 2004. DOI: 10.1016/j.cropro.2004.05.007.

PRIMAVESI, Ana. Manejo ecológico de “pragas” e doenças: técnicas alternativas para a produção agropecuária e defesa de meio ambiente. 2. ed. São Paulo: Expressão Popular, 2016.

RAZA, M. A. *et al.* Sugarcane/soybean intercropping enhances crop productivity, nutrient uptake, and net economic return with reduced inputs. *Field Crops Research*, v. 314, 2024. DOI: 10.1016/j.fcr.2024.109428.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Saneamento e Recursos Hídricos. Consórcio Engecorps–Maubertec. Plano Municipal Específico dos Serviços de Saneamento Básico: município de Chavantes – UGRHI 17 – Produto 4 (P4). São Paulo: SSRH, 2018. 288 p.

SOULÉ, M. *et al.* Effect of crop management and climatic factors on weed control in sugarcane intercropping systems. *Field Crops Research*, v. 306, 2024.

TAKANO, H. K. *et al.* Época seca e textura do solo afetam o controle químico de *Senna obtusifolia* em cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Herbicidas*, v. 14, n. 3, p. 181, 2015.

VANOLLI, B. S. *et al.* Guia prático de plantas de cobertura: espécies, manejo e impacto na saúde do solo. In: CHERUBIN, M. R. (org.). Piracicaba: USP/ESALQ, 2024.

VERRET, V. *et al.* Can legume companion plants control weeds without decreasing crop yield? A meta-analysis. *Field Crops Research*, v. 204, p. 158–168, 2017. DOI: 10.1016/j.fcr.2017.01.010.

VIAUD, P. *et al.* Sugarcane yield response to legume intercropped: A meta-analysis. *Field Crops Research*, v. 295, 2023.

VICTORIA FILHO, R.; CHRISTOFFOLETI, P. J. Manejo de plantas daninhas e produtividade da cana. *Visão Agrícola*, n. 1, p. 12-18, jan./jun. 2004.